

文章编号: 1000-7598-(2006) 07-1043-06

# CO<sub>2</sub> 驱煤层气中煤层膨胀对套管稳定性的影响

白 冰, 李小春, 刘延锋, 张 勇

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

**摘 要:** 随着中国经济的快速发展, 能源供需矛盾日益突出, 由于过度依赖化石能源, 大量排放 CO<sub>2</sub>, 致使面临的环境压力越来越大。CO<sub>2</sub> 驱煤层气(CO<sub>2</sub> enhanced coal-bed methane)技术可同时增产煤层气和大规模减排 CO<sub>2</sub>, 在我国具有良好应用前景, 但应用该技术在注采生产过程中因煤层吸附 CO<sub>2</sub> 产生的膨胀效应对套管稳定性的影响尚未引起重视。通过建立考虑 CO<sub>2</sub> 煤岩吸附膨胀效应的套管-充填材料-煤岩平面应变模型计算的套管应力和变形理论解与 ABAQUS 数值模拟结果具有良好的 consistency, 并分析了 CO<sub>2</sub> 吸附膨胀条件下套管应力的影响因素。分析结果表明, 膨胀对套管应力和变形具有显著影响。在给定 CO<sub>2</sub> 吸附浓度和套管内径条件下, 套管和充填材料的壁厚、充填材料和煤岩的力学参数是影响套管应力的主要因素, 可通过增加套管或(和)充填材料壁厚以及改变充填材料力学参数来降低套管应力。开发超低弹模和较大泊松比的充填材料是降低套管应力的有效途径。

**关 键 词:** CO<sub>2</sub> 驱煤层气; 吸附; 膨胀; 套管稳定性

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

## Influence of CO<sub>2</sub>-induced swelling on casing stability in CO<sub>2</sub>-ECBM

BAI Bing, LI Xiao-chun, LIU Yan-feng, ZHANG Yong

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The large amount of CO<sub>2</sub> emission as a result of excessively relying on the fossil energy leads to global warming. CO<sub>2</sub>-ECBM(CO<sub>2</sub> enhanced coal-bed methane) is an attractive way of enhancing CH<sub>4</sub> recovery and sequestering CO<sub>2</sub>. When CO<sub>2</sub> replaces CH<sub>4</sub> in the coalbeds in ECBM, it will generate dramatic swelling. This paper addresses the influence of the swelling on the casing stability. Consistent results are gained using the analytic model proposed by the authors and ABAQUS simulator. Swelling of coal can bring dramatic impact on the casing stability. Based on the analysis of the impact factors of casing stress, it can be concluded that the casing stress can be obviously weakened by promoting the wall thickness of the casing or by using the filling material of very high Poisson ratio and Young's modulus.

**Key words:** CO<sub>2</sub>-ECBM; coal swelling; adsorption; casing stability

## 1 引 言

为缓解 CO<sub>2</sub> 过度排放而引起的全球温室效应, 近年来国际上正在发展一种新的大规模 CO<sub>2</sub> 减排技术——CO<sub>2</sub> 驱煤层气<sup>[1~4]</sup> (CO<sub>2</sub>-ECBM)。CO<sub>2</sub> 驱煤层气是把从集中排放源收集到的 CO<sub>2</sub> 注入地下深部无商业开采价值的煤层中, 利用煤对 CO<sub>2</sub> 的优先吸附作用<sup>[5]</sup>, 将煤层气置换出来, 同时储存 CO<sub>2</sub>, 达到增加能源供给和缓解温室效应的目的。

煤岩是由割理(cleat)系统和煤基质微孔组成的双重孔隙介质。割理系统是气体渗流的主要通道,

基质孔隙则是煤岩气体吸附的主要场所。CO<sub>2</sub> 在煤岩中以自由态、微孔表面吸着态和基质吸收态 3 种方式存在<sup>[6]</sup>。自由态 CO<sub>2</sub> 赋存于大孔、裂隙中, 其含量远小于微孔表面吸着态和基质吸收态<sup>[7, 8]</sup>。微孔表面吸着态 CO<sub>2</sub> 随着温度、压力等环境条件改变, 可以与自由态 CO<sub>2</sub> 相互转化<sup>[9, 10]</sup>, 基质吸收态 CO<sub>2</sub> 和煤岩有机大分子发生复杂的化学反应, 引起煤岩力学性质改变, 一般不易脱附。Reucroft (1986 年, 1987 年)<sup>[11, 12]</sup> 报导了吸附态和吸收态 CO<sub>2</sub> 能够引起煤岩显著的膨胀现象, 随着压力升高, 最大膨胀线应变高达 4%。Ceglarska 等<sup>[13]</sup> 研究表明, 煤吸附

收稿日期: 2005-07-20

修改稿收到日期: 2005-10-18

基金项目: 中国科学院“百人计划”资助项目。

作者简介: 白冰, 男, 1980 年生, 博士研究生, 主要从事连续介质本构模型, CO<sub>2</sub> 地下储存稳定性, 煤层气注采等工程力学和环境岩土工程方面的研究。E-mail: bai\_bing@eyou.com

CO<sub>2</sub> 导致体积膨胀, 脱附后煤岩能够恢复原状。实际上, 不仅 CO<sub>2</sub> 能够引起煤岩膨胀, 煤层气 (CH<sub>4</sub>) 等气体的吸附与脱附也能引起煤岩体积胀缩<sup>[14]</sup>。

在 CO<sub>2</sub> 驱煤层气过程中, CO<sub>2</sub> 吸附和煤层气脱附引起的膨胀差对煤层应力场将产生显著影响, 进而可能对钻孔套管稳定性构成威胁。煤吸附膨胀对套管稳定性的影响程度的研究尚未见诸报导。本文建立了考虑 CO<sub>2</sub> 吸附膨胀效应的平面应变理论模型, 给出了算例, 将理论结果同数值模拟结果进行对比, 研究了 CO<sub>2</sub> 煤岩吸附膨胀效应对套管稳定性的影响程度, 并提出了降低影响的对策。

## 2 CO<sub>2</sub> 吸附膨胀平面应变模型

### 2.1 CO<sub>2</sub> 吸附膨胀应变

目前 CO<sub>2</sub> 吸附引起的煤岩膨胀应变试验数据在国际上还很少, 研究亦不深入。现有研究认为煤岩体积应变同煤岩朗格谬尔吸附量成线性关系<sup>[14]</sup>。

$$S = S_L \frac{\beta p}{1 + \beta p}; \quad \varepsilon_m = A_m S \quad (1)$$

式中  $S$  为煤对 CO<sub>2</sub> 的吸附量 (cm<sup>3</sup>/g);  $S_L$  为 Langmuir 吸附常数 (或极限吸附量, cm<sup>3</sup>/g);  $\beta$  为 Langmuir 压力常数 (1/Pa);  $p$  为气体压力 (Pa);  $A_m$  为煤岩体积膨胀系数 (g/cm<sup>3</sup>), 对于给定煤岩均假定为常数。

### 2.2 CO<sub>2</sub> 吸附膨胀平面应变理论模型

在 CO<sub>2</sub> 驱煤层气中, 通过地面压力设备将 CO<sub>2</sub> 经由套管注入深部煤层, CO<sub>2</sub> 沿煤层孔隙渗流扩散, 同时驱替煤层气, 直至煤层达到吸附饱和状态。吸附态 CO<sub>2</sub> 引起的煤层膨胀应力场叠加在初始地应力场上通过充填材料传递到套管, 若应力或变形过大, 可能造成套管破坏。图 1 为煤层、充填材料和套管的平面应变几何模型。套管内半径和壁厚分别为  $a$ 、 $\delta_1$ , 充填材料壁厚为  $\delta_2$ , 周围是无限大煤层介质。

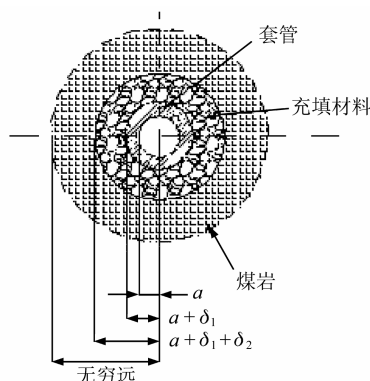


图 1 煤层、充填材料和套管几何模型

Fig.1 Plain strain geometric model of coal, filling material and casing

实际中地应力状态极其复杂, 而且介质表现为非均匀性和各向异性, 因此, 套管实际受力状态是相当复杂的, 本文仅讨论 CO<sub>2</sub> 吸附膨胀对套管稳定性的影响, 为此对模型作如下假设: (1) 套管、充填材料和煤岩分别为均匀各向同性线弹性材料; (2) 所有变形为无穷小变形; (3) 不考虑 CO<sub>2</sub> 吸附引起的煤岩力学性质改变; (4) 暂不考虑煤层初始地应力场 (若考虑, 可以在计算结果中叠加); (5) 平面应变; (6) 不考虑煤层水的影响; (7) 不考虑套管内压。

取以圆心为极点的极坐标系, 根据弹性力学<sup>[15]</sup>, 由轴对称条件、无体力条件下 3 种介质中任一点的平衡方程为

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2)$$

几何方程:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}; \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

本构方程 (对套管):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{2G_1}{1-\nu_1^*} (\varepsilon_r + \nu_1^* \varepsilon_\theta); \\ \sigma_\theta &= \frac{2G_1}{1-\nu_1^*} (\varepsilon_\theta + \nu_1^* \varepsilon_r); \\ \tau_{r\theta} &= G_1 \gamma_{r\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $G_1$  为套管材料的剪切模量;  $\nu_1^* = \frac{\nu_1}{1-\nu_1}$ , 为平面应变的等效泊松比, 其中  $\nu_1$  为泊松比。将  $G_1$  和  $\nu_1^*$  分别替换为  $G_2$  和  $\nu_2^*$ , 即为充填材料的本构方程。

对煤岩, 因 CO<sub>2</sub> 吸附, 需考虑膨胀效应, 类比热弹性本构关系<sup>[15]</sup>有

$$\sigma_r = \frac{E_3^*}{1-(\nu_3^*)^2} [\varepsilon_r + \nu_3^* \varepsilon_\theta - (1+\nu_3^*) \alpha_0 S] \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E_3^*}{1-(\nu_3^*)^2} [\varepsilon_\theta + \nu_3^* \varepsilon_r - (1+\nu_3^*) \alpha_0 S] \quad (6)$$

$$\tau_{r\theta} = G_3 \gamma_{r\theta} = 0 \quad (7)$$

式中  $E_3^* = \frac{E_3}{1-\nu_3^2}$ ,  $\nu_3^* = \frac{\nu_3}{1-\nu_3}$  为煤岩平面应变的等效泊松比;  $\nu_3$  为泊松比。

由轴对称条件, 设  $u_r = u_r(r)$ ,  $v_\theta = 0$ , 将几何方程代入本构方程, 然后代入平衡方程得位移表达式, 即

$$\text{对于套管: } u_r = c_1 r + c_2 \frac{1}{r} \quad (8)$$

$$\text{对于充填材料: } u_r = c_3 r + c_4 \frac{1}{r} \quad (9)$$

对于煤岩,  $S$  为常量, 故

$$u_r = (1 + \nu_0^3) \alpha_0 S \int_{a+\delta_1+\delta_2}^r \rho d\rho + c_5 r + \frac{c_6}{r} \quad (10)$$

式中  $c_1 \sim c_6$  均为积分常数;  $\alpha_0 = (1 + \nu_3) \alpha$ ,  $\alpha$  为由于 CO<sub>2</sub> 吸附和甲烷脱附引起的差异线膨胀系数 (g/cm<sup>3</sup>), 从而应力为

套管:

$$\sigma_r = \frac{2G_1}{1-\nu_1^*} \left[ c_1 - c_2 \frac{1}{r^2} + \nu_1^* \left( c_1 + \frac{c_2}{r^2} \right) \right], \quad a \leq r \leq a + \delta_1 \quad (11)$$

充填材料:

$$\sigma_r = \frac{2G_2}{1-\nu_2^*} \left[ c_3 - c_4 \frac{1}{r^2} + \nu_2^* \left( c_3 + \frac{c_4}{r^2} \right) \right], \quad a + \delta_1 \leq r \leq a + \delta_1 + \delta_2 \quad (12)$$

煤岩:

$$\sigma_r = -\alpha_0 E_3^* \frac{1}{r^2} \int_{a+\delta_1+\delta_2}^r S \rho d\rho + \frac{E_3^*}{1-(\nu_3^*)^2} \cdot \left[ c_5 (1 + \nu_3^*) - c_6 (1 - \nu_3^*) \frac{1}{r^2} \right], \quad a + \delta_1 + \delta_2 \leq r < +\infty \quad (13)$$

由应力边界条件、不同材料交界面法向应力连续性和法向位移连续性条件以及无限远处零位移边界条件得到确定上述积分常数的方程为

$$\frac{2G_1}{1-\nu_1^*} \left[ c_1 - c_2 \frac{1}{a^2} + \nu_1^* \left( c_1 + \frac{c_2}{a^2} \right) \right] = 0 \quad (14)$$

$$\sigma_r = \frac{2G_1}{1-\nu_1^*} \left[ c_1 - c_2 \frac{1}{(a+\delta_1)^2} + \nu_1^* \left( c_1 + \frac{c_2}{(a+\delta_1)^2} \right) \right] = \frac{2G_2}{1-\nu_2^*} \left[ c_3 - c_4 \frac{1}{(a+\delta_1)^2} + \nu_2^* \left( c_3 + \frac{c_4}{(a+\delta_1)^2} \right) \right] \quad (15)$$

$$\sigma_r = \frac{2G_2}{1-\nu_2^*} \left[ c_3 - c_4 \frac{1}{r^2} + \nu_2^* \left( c_3 + \frac{c_4}{r^2} \right) \right] = -\alpha_0 E_3^* \frac{S}{r^2} \left[ \frac{r^2 - (a + \delta_1 + \delta_2)^2}{2} \right] + \frac{E_3^*}{1-(\nu_3^*)^2} \left[ c_5 (1 + \nu_3^*) - c_6 (1 - \nu_3^*) \frac{1}{r^2} \right] \quad (16)$$

$$c_1(a + \delta_1) + c_2 \frac{1}{(a + \delta_1)} = c_3(a + \delta_1) + c_4 \frac{1}{(a + \delta_1)} \quad (17)$$

$$c_3(a + \delta_1 + \delta_2) + c_4 \frac{1}{a + \delta_1 + \delta_2} = c_5(a + \delta_1 + \delta_2) + \frac{c_6}{a + \delta_1 + \delta_2} \quad (18)$$

$$c_5 = -\frac{(1 + \nu_3^*) \alpha^* S}{2} \quad (19)$$

求解方程组式 (13) ~ (18) 得到积分常数  $c_1 \sim c_5$  的表达式, 将积分常数分别代入式 (8) ~ (13) 可得到位移表达式和应力表达式, 再将位移表达式代入式 (3) 可求出应变表达式。由于积分常数的表达式十分繁杂, 在此省略。

### 3 CO<sub>2</sub> 吸附膨胀效应数值模拟

为验证上述理论模型的正确性, 采用国际上广泛应用的 ABAQUS 数值仿真软件中热弹性本构模型模拟 CO<sub>2</sub> 浓度场引起的膨胀效应。用  $S$  替换温度场增量  $\Delta T$ ,  $\alpha$  替换热弹性的线膨胀系数。图 2 为变形前网格剖分图。根据对称性, 取模型的 1/4。远场采用无限元网格模拟零位移边界条件, 域内采用 4 节点平面应变有限单元。

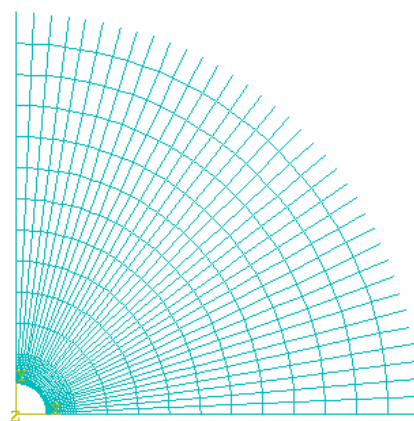


图2 有限元和无穷元网格

Fig.2 Finite element meshing of geometric model

表 1 为材料参数表和几何尺寸。表 2 为仿真结果与用上述理论模型计算值的对比, 其中  $\sigma_v$  为 Mises 应力

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_r^2 (1 - \nu + \nu^2) + \sigma_\theta^2 (1 - \nu + \nu^2) + 2\sigma_r \sigma_\theta (\nu^2 - \nu - 1)} \quad (20)$$

表 1 计算参数  
Table 1 Computational Parameters

| 参数                                       | 量值       | 意义                | 参考文献 |
|------------------------------------------|----------|-------------------|------|
| $a / \text{m}$                           | 0.060 68 | 套管内半径             | [16] |
| $\delta_1 / \text{m}$                    | 0.009 17 | 套管壁厚              |      |
| $\delta_2 / \text{m}$                    | 0.048 5  | 充填材料厚度            |      |
| $E_1 / \text{GPa}$                       | 210      | 套管弹性模量            | [17] |
| $\nu_1$                                  | 0.26     | 套管泊松比             |      |
| $E_2 / \text{GPa}$                       | 30       | 充填材料弹性模量          |      |
| $\nu_2$                                  | 0.17     | 充填材料泊松比           | [18] |
| $E_3 / \text{GPa}$                       | 2.97     | 煤岩弹性模量            |      |
| $\nu_3$                                  | 0.37     | 煤岩泊松比             |      |
| $\alpha / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 0.000 2  | 单位吸附线应变           | [19] |
| $S / \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$    | 28.32    | $\text{CO}_2$ 吸附量 | [14] |

表 2 理论解同模拟解对比  
Table 2 Comparison between analytical and numerical solutions

| 项目                        | 理论值     | 模拟值     | 偏差 / % |
|---------------------------|---------|---------|--------|
| $U_1 / 10^{-2} \text{mm}$ | -12.800 | -12.825 | 0.19   |
| $U_2 / 10^{-2} \text{mm}$ | -12.300 | -12.316 | 0.13   |
| $U_3 / 10^{-2} \text{mm}$ | -19.7   | -19.659 | 0.21   |
| $\sigma_v / \text{MPa}$   | 428.38  | 416.14  | 2.94   |
| $\varepsilon_1 / 10^{-5}$ | 74.40   | 70.07   | 6.18   |
| $\varepsilon_2 / 10^{-5}$ | -212.00 | -207.17 | 2.33   |

注:  $U_1$  套管内壁径向位移;  $U_2$  为套管充填材料交界面径向位移;  $U_3$  为充填材料煤岩交界面径向位移;  $\sigma_v$  为套管内壁 Mises 应力;  $\varepsilon_1$  为套管内壁最大主应变;  $\varepsilon_2$  套管内壁最小主应变。

对比表明, 用理论模型计算结果与 ABAQUS 数值模拟结果具有良好的一致性, 从而可以采用 ABAQUS 软件模拟  $\text{CO}_2$  吸附膨胀的影响。从表 2 可以看出  $\text{CO}_2$  吸附膨胀能够对套管应力和变形产生显著影响。应当指出, 本文的  $S$  (表 1) 参照文[14]取值, 但研究表明, 随着气体压力增加, 煤岩饱和吸附量会进一步增加, 从而产生更大的膨胀效应。

#### 4 影响套管应力的因素及对策

由上述理论和数值分析可知,  $\text{CO}_2$  煤层吸附膨胀可对套管应力和变形具有显著影响。确保钻孔套管稳定性, 如果强度还不能满足要求, 可以研究套管应力的降低措施, 找出影响套管应力的因素, 提出解决方案。

影响套管应力的因素包括套管内径、壁厚、材料性质 (弹性模量、泊松比), 充填材料的壁厚、材料性质 (弹性模量、泊松比) 以及煤岩材料性质 (弹性模量、泊松比、吸附膨胀差应变)。因套管内径与工程设计相关, 不易调控, 本文仅研究套管壁厚、材料性质, 充填材料的壁厚、材料性质以及煤岩材

料性质对套管应力的影响。尽管对于给定的场地, 煤岩材料性质在本文前述的模型假定下也是不能改变的, 但此处作为研究, 也给出煤岩弹模对套管应力的影响。影响程度采用下文的套管应力影响因子衡量。根据 Mises 屈服条件, 定义套管应力影响因子  $\gamma = \sigma_v / \sigma_s$ ,  $\sigma_s$  为套管金属单轴抗拉 (压) 强度。本文计算的套管规格均为 P110 型 ( $\phi 139.7 \text{ mm} \times 9.17 \text{ P110}$ ), 屈服极限为 797 MPa。表 3 为算例组合。

表 3 考虑不同影响因素的算例  
Table 3 Cases of different parameter conditions

| 算例 | $\delta_1 / \text{m}$ | $\delta_2 / \text{m}$ | $E_2 / \text{GPa}$ | $\nu_2$ | $E_3 / \text{GPa}$ | $\gamma$ |
|----|-----------------------|-----------------------|--------------------|---------|--------------------|----------|
| 1  | 0.009 17              | 0.048 5               | 30                 | 0.17    | 2.97               | 0.522 1  |
| 2  | 0.009 17              | 0.048 5               | 30                 | 0.39    | 2.97               | 0.454 1  |
| 3  | 0.009 17              | 0.048 5               | 30                 | 0.37    | 2.97               | 0.461 5  |
| 4  | 0.009 17              | 0.048 5               | 30                 | 0.26    | 2.97               | 0.497 7  |
| 5  | 0.009 17              | 0.048 5               | 30                 | 0.12    | 2.97               | 0.533 9  |
| 6  | 0.009 17              | 0.048 5               | 30                 | 0.10    | 2.97               | 0.538 2  |
| 7  | 0.009 17              | 0.048 5               | 35                 | 0.17    | 2.97               | 0.500 7  |
| 8  | 0.009 17              | 0.048 5               | 15                 | 0.17    | 2.97               | 0.591 3  |
| 9  | 0.009 17              | 0.048 5               | 10                 | 0.17    | 2.97               | 0.608 8  |
| 10 | 0.009 17              | 0.048 5               | 2.97               | 0.17    | 2.97               | 0.557 1  |
| 11 | 0.009 17              | 0.048 5               | 2.35               | 0.17    | 2.97               | 0.529 8  |
| 12 | 0.009 17              | 0.048 5               | 1.85               | 0.17    | 2.97               | 0.496 9  |
| 13 | 0.009 17              | 0.048 5               | 30                 | 0.17    | 3.192              | 0.558 8  |
| 14 | 0.009 17              | 0.048 5               | 30                 | 0.17    | 2.34               | 0.416 4  |
| 15 | 0.009 17              | 0.048 5               | 30                 | 0.17    | 1.718              | 0.309 5  |
| 16 | 0.009 17              | 0.048 5               | 30                 | 0.17    | 1.437              | 0.260 3  |
| 17 | 0.007 72              | 0.048 5               | 30                 | 0.17    | 2.97               | 0.576 8  |
| 18 | 0.011 43              | 0.048 5               | 30                 | 0.17    | 2.97               | 0.462 0  |
| 19 | 0.014 33              | 0.048 5               | 30                 | 0.17    | 2.97               | 0.407 4  |
| 20 | 0.019 48              | 0.048 5               | 30                 | 0.17    | 2.97               | 0.342 7  |
| 21 | 0.009 17              | 0.053 35              | 30                 | 0.17    | 2.97               | 0.519 7  |
| 22 | 0.009 17              | 0.041 23              | 30                 | 0.17    | 2.97               | 0.521 9  |
| 23 | 0.009 17              | 0.035 04              | 30                 | 0.17    | 2.97               | 0.523 3  |
| 24 | 0.009 17              | 0.029 78              | 30                 | 0.17    | 2.97               | 0.524 7  |

注: 算例 1 为基准算例, 其余算例参数以该算例为基准浮动取值。

图 3 为充填材料弹性模量固定为 30 GPa 时套管内壁应力影响因子  $\gamma$  随充填材料泊松比的变化规律 (算例 1~6)。结果表明, 增加充填材料泊松比能够降低套管应力影响因子, 但泊松比增加 2.9 倍,  $\gamma$  降低约 15.6 %。图 4 为充填材料泊松比固定为 0.17 时  $\gamma$  随充填材料弹性模量的变化规律 (算例 1, 7~12)。结果表明, 随充填材料弹性模量增加,  $\gamma$  先增加后缓慢减小, 充填材料弹模存在一个最不利影响值。对本算例充填材料弹性模量在正常值 (如 30 GPa) 基础上增加和减少单位量时,  $\gamma$  变化不显著。当弹性模量降低到 10 GPa 以后, 继续降低弹性模量,  $\gamma$  显著降低。图 5 为充填材料泊松比固定为 0.17 时  $\gamma$  随煤岩弹性模量的变化规律 (算例 1 和算例 13~

16)。结果表明煤岩介质对套管应力的影响随着煤岩弹性模量的增加显著增长。图6为套管和充填材料壁厚对 $\gamma$ 的影响。结果表明,随着套管壁厚的增加,套管内壁 $\gamma$ 显著降低,套管壁厚增加1.5倍, $\gamma$ 降低约40.6%。随着充填材料壁厚增加, $\gamma$ 变化不显著,充填材料壁厚增加增加79%, $\gamma$ 仅降低约0.96%。

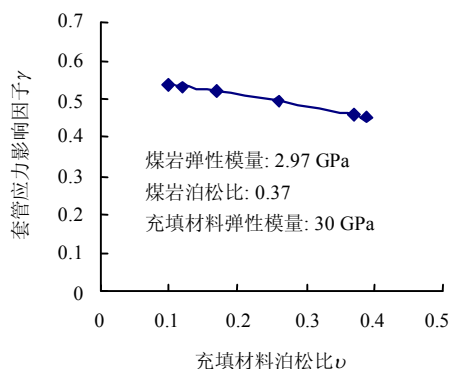


图3 充填材料泊松比与 $\gamma$ 的关系

Fig.3 Impact of Poisson ratio on the  $\gamma$  of casing

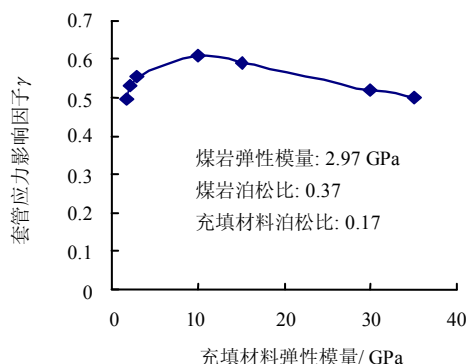


图4 充填材料弹性模量与 $\gamma$ 的关系

Fig.4 Impact of elastic modulus of filling material on the  $\gamma$  of casing

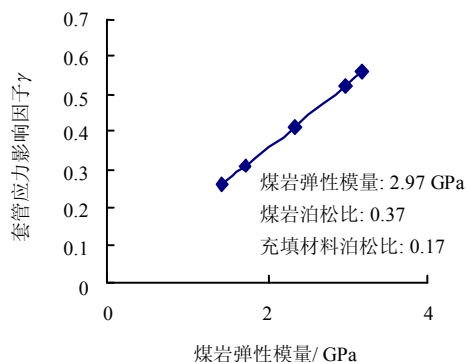


图5 煤岩弹性模量与 $\gamma$ 的关系

Fig.5 Impact of elastic modulus of coal on the  $\gamma$  of casing

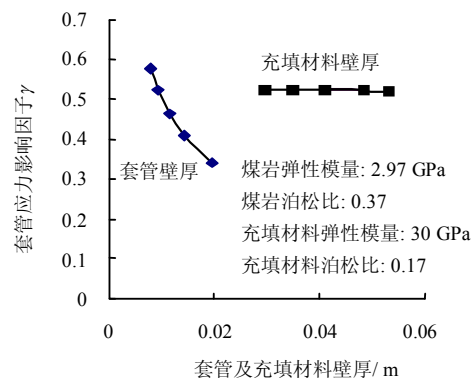


图6 套管和充填材料壁厚与 $\gamma$ 的关系

Fig.6 Impact of walls thickness of casing and filling material on the  $\gamma$  of casing

上述分析表明,在给定 CO<sub>2</sub> 吸附浓度和套管内径条件下套管壁厚、充填材料和煤岩的力学参数是套管应力的主要影响因素。实际工程中,煤岩物性参数为常量,不能改变,但对高弹模煤区施工时,由于  $E$  增大能够显著提高套管应力,应当采取适当措施。增加套管壁厚以及改变充填材料力学参数可显著降低套管应力。增加套管壁厚效果显著,一般可作为首选,若仍不能满足要求或成本过高可采用高泊松比充填材料。应当注意,由图4可知,当充填材料弹性模量取某一值时能够对套管产生最不利影响,因此选择固井充填材料应尽量远离这一弹性模量。

## 5 讨论

林凯等<sup>[20]</sup> (2004 年)采用弹性力学中内外压共同作用的拉梅方程,分析了不同厚度充填材料(水泥环)对提高套管抗挤强度的影响,认为在厚度小于 20 mm 条件下水泥环分担内外压不超过 10 %,然后,通过试验验证得出水泥环对于提高抗外压能力效果在 5 %以内,效果很不显著,进而认为套管强度设计不需考虑水泥环的影响。另一方面在给定 CO<sub>2</sub> 吸附浓度和套管内径条件下,套管壁厚、充填材料和煤岩的力学参数是套管应力的主要影响因素。增加充填材料泊松比和套管壁厚能够显著降低套管应力,而提高煤岩弹模能够显著提高套管应力。增加套管壁厚效果显著,一般可作为首选,若仍不能满足要求或成本过高可采用高泊松比充填材料。

煤层吸附 CO<sub>2</sub> 能够产生显著的膨胀应变,本文给出了计算考虑 CO<sub>2</sub> 吸附膨胀效应的平面应变模型,并通过数值模拟加以印证。然而,由于 CO<sub>2</sub> 煤层吸附膨胀效应的机理和规律目前还不十分清楚,

影响因素众多,相应的试验数据还相当缺乏。上述计算中对煤岩  $\text{CO}_2$  吸附膨胀参数值的选取具有一定的主观性,因此需进一步的试验研究,以便给出膨胀变形和吸附量之间更准确的关系。此外,吸附态  $\text{CO}_2$  同煤岩相互作用能够引起煤岩力学性质显著改变,煤层中往往含有煤层水,套管受力和变形也不是简单的平面应变问题,煤层往往具有很高的初始地应力,这些因素也未考虑进来,需要进一步地研究。

### 参考文献

- [1] Bergen F van, Gale J, Damen K J, et al. Worldwide selection of early opportunities for  $\text{CO}_2$ -enhanced oil recovery and  $\text{CO}_2$ -enhanced coal bed methane production[J]. **Energy**, 2004, 29(9): 1 611—1 621.
- [2] Hamelinck C N, Faaij A P C, Turkenburg W C, F van Bergen, Pagnier H J M, Barzandji O H M, Wolf K -H A A, Ruijg G J.  $\text{CO}_2$  enhanced coalbed methane production in the Netherlands[J]. **Energy**, 2002, 27 (7): 647—674.
- [3] Voormeij D A, Simandl G J, Geological. Ocean and mineral  $\text{CO}_2$  sequestration options: a technical review[J]. **Geoscience Canada**, 2004, 31(1): 11—22.
- [4] 李小春, 小出仁, 大隅多加志. 二氧化碳地中隔离技术及其岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 989—994.  
LI Xiao-chun, Koide Histoshi, Ohsunmi Takashi.  $\text{CO}_2$  geological storage and the related rock mechanics issues [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(6): 989—994.
- [5] 哈瑞·史瑞尔斯. 荷兰煤层气开发应用  $\text{CO}_2$  注入技术的可行性——潜力与经济性评价[A]. 2002 年第三届国际煤层气论坛论文集[C]. 罗新荣, 卡尔·舒尔兹, 胡予红主编, 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.
- [6] John W Larsen. The effects of dissolved  $\text{CO}_2$  on coal structure and properties[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2004, 57: 63—70.
- [7] Maria Mastalerz, Hal Gluskoter, John Rupp. Carbon dioxide and methane sorption in high volatile bituminous coals from Indiana, USA[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2004, 60: 43—55.
- [8] 梁冰, 章梦涛, 潘一山, 等. 瓦斯对煤的力学性质及力学响应影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 12—18.  
LIANG Bing, ZHANG Meng-tao, PAN Yi-shan, et al. The experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(5): 12—18.
- [9] 王恩元, 何学秋, 林海燕. 瓦斯气体在煤中的赋存状态[J]. 煤炭工程师, 1996, (5): 12—19.  
WANG En-yuan, HE Xue-qiu, LIN Hai-yan. States of methane reserved in coal deposit[J]. **Coal Engineer**, 1996, (5): 12—15, 18.
- [10] 张力, 何学秋, 王恩元, 等. 煤吸附特性的研究[J]. 太原理工大学学报, 2001, 32(4): 449—451.  
ZHANG Li, HE Xue-qiu, WANG En-yuan, et al. Study of absorptive characteristics of coal[J]. **Journal of Taiyuan University of Technology**, 2001, 32(4): 449—451.
- [11] Reucroft P J, Patel H. Gas-induced swelling in coal[J]. **Fuel**, 1986, 65: 816—820.
- [12] Reucroft P J, Sethuraman A R. Effect of pressure on carbon dioxide induced coal swelling[J]. **Energy & Fuels**, 1987, 1(1): 72—75.
- [13] Ceglarska-Stefanska G, Czaplinski A. The effect of limitation free expansion of hard coal on the sorption of carbon dioxide[J]. **Arch Montanistica Slovaca**, 1991, 16: 369—378.
- [14] Pekot L J, S Reeves R. Modeling coal matrix shrinkage and differential swelling with  $\text{CO}_2$  injection for enhanced coalbed methane recovery and carbon sequestration applications[R]. Advanced Resources International. U.S.: U. S. D. epartment of Energy DE-FC26-00NT40924 2002.
- [15] 陆明万, 罗学富. 弹性理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [16] 练章华, 王钢, 何明烛, 等. 套管变形的计算机仿真[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(3): 21—30.  
LIAN Zhang-hua, WANG Gang, HE Ming-zhu, et al. Computer imitation about casing deformation[J]. **Oil Drilling & Production Technology**, 1994, 16(3): 21—30.
- [17] 宋明, 杨凤香, 宋胜利, 等. 固井水泥环对套管承载能力的影响规律[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(4): 7—10.  
SONG Ming, YANG Feng-xiang, SONG Sheng-li, et al. Influencing tendencies of cement sheath on casing retaining capacity[J]. **Oil Drilling & Production Technology**, 2002, 24(4): 7—10.
- [18] 李军, 陈勉, 张辉, 等. 不同地应力条件下水泥环形状对套管应力的影响[J]. 天然气工业, 2004, 24(8): 50—53.  
LI Jun, CHEN Mian, ZHANG Hui, et al. Influence of cement sheath shape on casing stress under different ground stress conditions[J]. **Natural Gas Industry**, 2004, 24(8): 50—53.
- [19] 李同林, 乌效鸣, 屠厚泽. 煤岩力学性质测试分析与应用[J]. 地质与勘探, 2000, 36(2): 85—88.  
LI Tong-lin, WU Xiao-ming, TU Hou-ze. The measurement and analysis and application on the mechanical property of coal seam[J]. **Geology and Prospecting**, 2000, 36(2): 85—88.
- [20] 林凯, 杨龙, 史交齐, 等. 水泥环对套管强度影响的理论和试验研究[J]. 石油机械, 2004, 32(5): 13—16.  
LIN Kai, YANG Long, SI Jiao-qi, et al. The theory and test research about cement sheath influence to the casing strength[J]. **China Petroleum Machinery**, 2004, 32(5): 13—16.